

EFEITO DE CAMADAS ESPESSAS DE ÓXIDOS NO COMPORTAMENTO EM DESGASTE DO AÇO INOXIDÁVEL 410D *

Amanda Aparecida Fátima Arruda¹

Ana Cecília de Carvalho²

Paulo Sérgio Moreira³

Rhelman Rossano Urzêdo Queiróz⁴

Geraldo Lúcio de Faria⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho em desgaste de camadas espessas de óxidos formadas na superfície do aço inoxidável ferrítico 410D após a sua submissão a tratamentos isotérmicos em atmosfera oxidante. O aço em questão foi estudado no estado de entrega e tratado isotermicamente nas temperaturas de 900°C e 1000°C por diferentes intervalos de tempo. O método de avaliação empregado foi o teste de desgaste micro-abrasivo do tipo esfera presa em placa. Com o desenvolvimento do estudo, foi possível executar análises qualitativas e quantitativas a respeito do comportamento em desgaste do aço inoxidável 410D em função de sua condição superficial, como oxidada ou não. Alterações microestruturais também foram consideradas na discussão dos resultados. Concluiu-se que a camada superficial de óxidos desenvolvida após os tratamentos isotérmicos possui boa aderência e tem potencial para aplicação como camada protetora do aço em aplicações onde a sua resistência ao desgaste seja requerida.

Palavras-chave: Aço Inoxidável Ferrítico; Camada de Óxidos; Ensaio de Desgaste.

EFFECT OF THICK OXIDE LAYER ON THE WEAR BEHAVIOR OF A 410D FERRITIC STAINLESS STEEL

Abstract

The aim of this work was to evaluate the wear performance of thick oxide layers formed on the ferritic 410D stainless steel after its submission to isothermal heat treatments in an oxidizing environment. The 410D stainless steel was studied as manufactured and as heat treated at 900°C and 1000°C for different periods of time. The evaluation-applied method was the micro-abrasive wear test. The ball fastened to the plate methodology was applied. This study presents a qualitative and quantitative analysis of the 410D stainless steel in relation to its wear behavior in function of its superficial condition, as oxidized, or not oxidized. Microstructural alterations were also considered on result discussions. It was concluded that the surficial oxide layer developed after the isothermal heat treatments are adherent and has a great potential to be applied as a steel protection layer in applications where its wear performance is required.

Keywords: Ferritic Stainless Steel; Oxide Layer; Wear Tests.

¹ Engenharia Metalúrgica, Graduada na Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

² Engenharia Metalúrgica, Graduando na Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenharia Metalúrgica, Graduada na Universidade Federal de Ouro Preto, Mestre em Engenharia de Materiais, Técnico, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Engenharia Metalúrgica, Graduado na Universidade Federal de Ouro Preto, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas – UFMG, Professor, Departamento de Metalurgia, Instituto Federal de Minas Gerais, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

⁵ Física Aplicada a Ciência de Materiais Graduado na Universidade Federal de Ouro Preto, Doutor em Engenharia de Materiais, Professor, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O aço 410D (UNS S41003) é um aço inoxidável ferrítico ainda em desenvolvimento e fabricado a um tempo relativamente curto no Brasil. A sua composição química é relativamente simples para um aço inoxidável, não havendo adições de grande quantidade de elementos de liga com elevado preço no mercado, o que o torna um aço inoxidável com custo relativamente baixo. Logo, em relação à questão econômica, pode-se afirmar que o aço inoxidável ferrítico 410D é competitivo com os aços baixo carbono comuns e possui uma vantagem em relação aos outros aços inoxidáveis ferríticos. Entretanto, em projetos de engenharia, além da questão econômica, é necessário ter conhecimento técnico e segurança em relação ao desempenho do material utilizado. Portanto, é necessário que o seu comportamento em condições que se assemelhem às de aplicação, seja estudado e bem conhecido. Nesse cenário, recentemente diversos estudos vêm sendo conduzidos com o objetivo de se avaliar as propriedades e características desse aço quando exposto a diversas situações, visando estimular a utilização do mesmo em aplicações diversas. Trabalhos já publicados discutem o seu comportamento em tratamentos térmicos de recozimento de recristalização após deformação a frio, abordam a susceptibilidade do aço à sensitização, discutem a termodinâmica e a cinética de transformação de fases e até mesmo a cinética de formação de filmes de óxidos sobre a sua superfície [1-5].

Em um estudo realizado por Vilela (2017) obteve-se por simulação computacional o diagrama de fases no equilíbrio para o aço inoxidável ferrítico 410D. Concluiu-se com o diagrama de equilíbrio que o campo monofásico austenítico deste aço se estende no intervalo de temperatura de 822,6 a 1186°C. Logo as temperaturas 900°C e 1000°C estão acima da temperatura crítica Ac1 e abaixo de Ac3. Portanto, nessa região intercrítica, a ferrita é parcialmente transformada em austenita, fase que dissolve mais carbono. Em decorrência da elevada temperabilidade do aço, no resfriamento, essa austenita com maior concentração de carbono transforma-se em martensita, resultando em uma estrutura bifásica [1,2].

Arruda et al. (2018) estudaram o aço em questão após tratamentos térmicos em temperaturas acima de 900°C onde a formação de estruturas bifásicas composta de martensita e ferrita foram confirmadas. Segundo os autores, quanto maior a temperatura de tratamento térmico, maior a fração de martensita formada. Essa estrutura bifásica leva a um aumento da dureza do material [2].

Arruda et al. (2018) também mostraram que durante a oxidação do aço inoxidável 410D em temperaturas acima de 900°C, ao ar atmosférico, ocorre a formação de duas camadas espessas de óxidos com características distintas. A primeira camada de óxidos que cresce sobre o aço inoxidável é rica em cromo, compacta e aderente ao substrato. Acima dessa camada de óxido de cromo ocorre a formação de um segundo filme quebradiço e pouco aderente, rico em óxido de ferro [2].

Considerando-se que em muitas aplicações em setores industriais o desgaste de componentes interrompe ou retarda a produção, culminando em elevados custos de manutenção, não é suficiente ter conhecimento apenas sobre o comportamento mecânico sob carregamento estático, mas também em desgaste dos produtos [7]. O aço 410D já vem substituindo aços baixo carbono comuns em aplicações no setor sucroenergético, e um grande desafio para melhorar o desempenho de alguns componentes manufaturados utilizando-se esse aço como matéria prima, é buscar mecanismos de aumentar a sua resistência ao desgaste, visto que em termos de

propriedades químicas e carregamento estático o seu comportamento é satisfatório [3,4].

A utilização de revestimentos superficiais nobres e a aplicação de tratamentos térmicos superficiais são geralmente utilizados para aumentar a vida em desgaste de materiais diversos expostos à abrasão e erosão. Entretanto, muito desses métodos são de elevado custo e acabam agregando valor ao produto final, inviabilizando economicamente a sua aplicação em segmentos menos nobres. No entanto, sabe-se que em alguns setores, o mecanismo utilizado para melhorar a vida em desgaste de componentes é crescer filme de óxidos espesso e aderentes sobre as suas superfícies. Esse filme funciona como uma camada protetora para o substrato e também como um tipo de lubrificante à medida que partículas finas se desprendem, diminuindo significativamente a taxa de desgaste do componente. Essa metodologia é atualmente empregada em alguns sistemas não ferrosos com adição de cromo e em mandris utilizados no processo de laminação de tubos de aço sem costura, por exemplo [7,8].

Neste cenário, e tendo em vista a possibilidade de ampliação das possibilidade de aplicação do aço 410D em situações que exijam bom desempenho em desgaste, é necessário que estudos sejam conduzidos com o objetivo de caracterizar e avaliar o seu comportamento. Assim sendo, este trabalho se propôs a avaliar o desempenho de camadas espessas de óxidos formadas na superfície do aço 410D como mecanismo de proteção, caracterizando assim o seu comportamento em desgaste por meio da utilização de ensaios de desgaste microabrasivo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O material estudado neste trabalho é um aço inoxidável ferrítico do tipo 410D produzido pela empresa Aperam South América. A composição química do aço é apresentada na Tabela 1. As amostras utilizadas foram provenientes de uma chapa com espessura de 6mm laminada à quente, recozida e laminada à frio.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável ferrítico 410D (% em peso).

Elemento	C	Cr	Mn	Si	P	S
Concentração	0,007	11,43	0,588	0,603	0,023	0,0005
Elemento	Ni	Nb	Ti	V	Mo	Al
Concentração	0,329	0,015	0,001	0,028	0,008	0,002

Analisando a composição química apresentada na Tabela 1, observa-se o caráter inoxidável do aço devido ao teor de cromo acima de 11%. Contudo, o teor de carbono é baixo o que contribui para aumentar o campo de estabilidade da fase ferrita e dificulta a formação de carbonetos e nitretos de cromo evitando um possível empobrecimento local de cromo que poderia causar a corrosão intergranular. Os elementos nióbio, titânio e molibdênio estão presentes em quantidades muito baixas podendo-se afirmar que este aço não é estabilizado. O molibdênio, níquel e cromo são adicionados para aumentar a resistência à corrosão deste aço que é a principal propriedade vislumbrada nos aços inoxidáveis [1-5].

2.2 Tratamentos Isotérmicos

As amostras do aço inoxidável ferrítico 410D (30mmx30mmx6mm) foram submetidas a tratamentos isotérmicos em diferentes temperaturas por diferentes intervalos de tempo. Os tratamentos térmicos foram realizados em um forno tipo Mufla do Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica (LTM) do DEMET – UFOP em atmosfera constituída por ar natural. Os tratamentos foram realizados em duas condições, com suporte feito de aço carbono e outra com um suporte refratário, com o objetivo de verificar se o contato direto entre um suporte fabricado de um aço quimicamente menos nobre do que o inoxidável 410D poderia influenciar significativamente a sua oxidação. A Figura 1 apresenta as condições de tratamentos térmicos aplicadas nas amostras submetidas aos ensaios de desgaste.

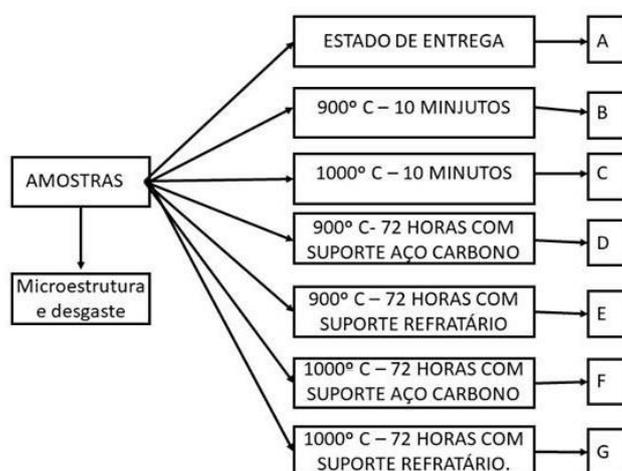


Figura 1. Esquema ilustrando as temperaturas e intervalos de tempo dos tratamentos isotérmicos das amostras submetidas ao ensaio de desgaste microabrasivo.

2.3 Ensaio de Desgaste Micro-abrasivo

Após os tratamentos térmicos as amostras foram submetidas aos ensaios de desgaste microabrasivo. O teste de desgaste microabrasivo foi desenvolvido para permitir a análise quantitativa de resistência ao desgaste de um material independentemente do tamanho, curvatura, profundidade e dureza da amostra. O ensaio utiliza um sistema mecânico que envolve uma esfera de aço em rotação na direção oposta a amostra com a aplicação de uma força Normal (N).

A esfera de aço é presa entre eixos coaxiais e verticalmente em um braço articulado e é carregada contra a esfera por um peso morto pendurado em um braço de alavanca. Uma suspensão de micropartículas abrasivas de carbeto de silício suspensas em água destilada, agitada continuamente para evitar a sedimentação, foi introduzida constantemente entre a esfera e a amostra, gerando uma calota esférica na superfície da amostra. O diâmetro d da calota formada e as características morfológicas da superfície desgastada da amostra são analisadas posteriormente [8]. A Figura 2 mostra uma esquematização de como ocorre o ensaio de desgaste e ilustra uma calota formada na superfície de uma amostra durante o ensaio.

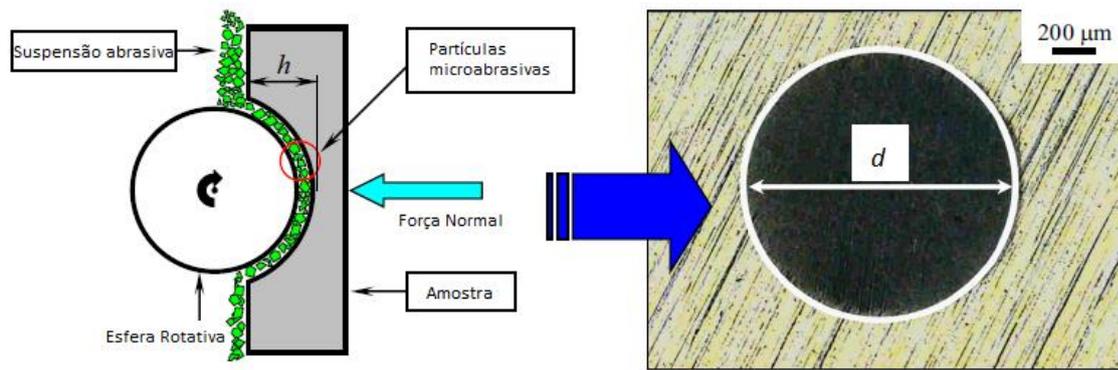


Figura 2. Teste de desgaste microabrasivo por esfera rotativa: figuras mostrando o princípio de funcionamento e as partículas abrasivas entre a esfera e o corpo de prova. No exemplo da calota de desgaste, "h" é a profundidade e "d" é o diâmetro da calota de desgaste.

Os ensaios de resistência ao desgaste foram executados em triplicata no equipamento do tipo esfera presa sobre placa no Laboratório de Fundição do DEMET-UFOP. Os parâmetros utilizados nos ensaios estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nos ensaios de Desgaste Micro-abrasivo

Carga aplicada	Velocidade de rotação da esfera	Distância de rodagem	Material da esfera	Diâmetro da esfera	Abrasivo	Concentração da suspensão abrasiva
0,5 N	100 rpm	180 m	Aço AISI 52100	25mm	Carboneto de silício F1200	200g/l

As calotas formadas durante o ensaio de desgaste foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Nanolab – REDEMAT-DEMET. A análise consistiu na realização da medição dos diâmetros e áreas das calotas formadas durante o ensaio de desgaste, assim como na caracterização das superfícies de desgaste para análise dos mecanismos atuantes. Também foi executada uma análise química semiquantitativa, via EDS, no centro das calotas, com o objetivo de verificar se a superfície do substrato havia, ou não sendo atingida.

A partir das análises feitas por MEV, obteve-se os diâmetros das calotas (d) em cada ensaio, e por meio das equações 1, 2, 3 e 4, foi possível obter, respectivamente, o volume de material retirado (V), a profundidade da calota (h), o coeficiente de desgaste (μ), e a taxa de desgaste (k).

$$V = \frac{\pi d^4}{64R} \quad (1)$$

$$h = \frac{d^2}{8R} \quad (2)$$

Rutherford e Hutchings (1997) generalizaram as equações previamente propostas por Kassman et al. (1991) que permitem calcular o coeficiente de desgaste (k) a partir do diâmetro da calota gerada durante o ensaio para o caso de amostras planas. O coeficiente de desgaste pode ser determinado a partir da Equação 3 [8].

$$k = \frac{\pi d^4}{64R F_N S} [m^3 / Nm] \quad (3)$$

Sendo, d = diâmetro da calota esférica resultante; R = raio da esfera; F_N = força normal; S = distância de deslizamento.

De acordo com Hutchings (1997), considerando-se as partículas abrasivas atuantes no sistema e a Equação 3 de Hutchings pode ser definida a Equação 4 para o desgaste abrasivo [8].

$$Q = kF_N \quad (4)$$

Onde Q é a taxa de desgaste, representando o volume de material removido de acordo com a unidade de distância de deslizamento (mm^3/m), F_N é a força normal total aplicada sobre o sistema e o coeficiente de desgaste, k , pode ser interpretado como o volume de material desgastado por unidade de força e por unidade de distância de deslizamento ($\text{mm}^3/\text{N.m}$) [8].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Quantitativa

As amostras descritas na Figura 1 foram analisadas de forma quantitativa e qualitativa, após a execução dos ensaios de desgaste. A análise quantitativa foi realizada por meio da utilização das Equações 1, 2, 3 e 4, descritas na seção de Materiais e Métodos. O diâmetro da calota foi medido por meio da análise das amostras em um microscópio eletrônico de varredura e as demais grandezas como o volume e a área da calota formada na superfície da amostra durante o ensaio de desgaste, além do coeficiente e da taxa de desgaste do material, foram calculados. Na Tabela 3 pode-se observar os resultados obtidos para cada amostra.

Tabela 3. Resultado da análise quantitativa dos ensaios de desgaste.

Amostra	Diâmetro da calota (mm)	Volume da calota (mm^3)	Profundidade da calota (mm)	Coeficiente de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)	Taxa de desgaste (mm^3/m)
A	2,35	0,119	0,0551	0,0013	0,0007
B	2,49	0,151	0,0620	0,0017	0,0008
C	2,02	0,065	0,0407	0,0007	0,0004
D	2,06	0,071	0,0426	0,0008	0,0004
E	2,48	0,149	0,0617	0,0017	0,0008
F	2,70	0,209	0,0730	0,0023	0,0012
G	3,10	0,362	0,0961	0,0040	0,0020

Deve-se destacar que segundo Vilela (2017) e Arruda et al. (2018), ao se aquecer o aço inoxidável 410D a 900°C , ele será parcialmente austenitizado e será constituído por uma microestrutura bifásica, majoritariamente ferrítica com uma pequena fração

de martensita, após o resfriamento. Ao ser aquecido a 1000°C, ele será quase completamente austenitizado, sendo sua microestrutura após resfriamento, majoritariamente martensítica [1,2]. Ainda, segundo Arruda et al. (2018), em tratamentos isotérmicos de 10 minutos a 900°C e 1000°C, ao ar natural, não haverá crescimento expressivo do filme de óxidos. Assim sendo, pode-se comparar o desempenho em desgaste das amostras A, B e C, considerando-se apenas os efeitos microestruturais dos tratamentos térmicos. Nesse sentido, observa-se claramente que o comportamento da amostra C, majoritariamente martensítica é significativamente melhor do que o das amostras A e B devido ao aumento da dureza do material.

Observa-se ainda que apesar da condição B ser constituída por ferrita e uma pequena fração de martensita [2], ela apresentou pior desempenho em relação ao estado de entrega (A). Isso pode ser justificado, pois durante a austenitização intercristica a 900°C, a ferrita remanescente, e em maior quantidade, provavelmente se recuperou, diminuindo a sua densidade de discordâncias e aliviando tensões. Uma vez mais macia, a ferrita contribuiu para o aumento do coeficiente de desgaste em relação ao estado de entrega.

Ao se avaliar as condições D, E, F e G, em que todas as amostras permaneceram por 72h nas temperaturas de isoterma, percebe-se claramente um aumento no diâmetro das calotas e no coeficiente de desgaste em relação às amostras A, B e C. Observa-se ainda que, sistematicamente, o coeficiente de desgaste sempre foi maior quando se utilizou o suporte refratário durante os tratamentos isotérmicos. Conforme já mencionado, segundo Arruda et al. (2018), durante os tratamentos isotérmicos a 900°C e 1000°C, por longos períodos de tempo, há a formação de duas camadas de óxidos na superfície das amostras com características distintas: uma rica em Cr, muito aderente ao substrato, e outra rica em Fe e pouco aderente. Segundo os autores, quando se utilizou o suporte refratário, a cinética de oxidação foi favorecida e a camada de óxidos rica em Fe se desenvolveu mais, quando comparada à situação em que o suporte de aço carbono foi utilizado. Da mesma forma com o aumento da temperatura, e favorecimento da cinética de oxidação, também teria havido maior formação da camada rica em Fe, justificando o comportamento semelhante em desgaste [2].

Assim sendo, durante a realização dos ensaios de desgaste, era esperado que essa camada menos aderente fosse facilmente removida, indicando aumento do coeficiente de desgaste para as condições mais favoráveis ao crescimento do filme rico em Fe, o que foi comprovado com os resultados obtidos: **efeito da temperatura** - as amostras tratadas termicamente a 900°C (D e E) possuem um menor coeficiente de desgaste em relação às amostras tratadas a 1000°C (F e G); **efeito do suporte** - as amostras tratadas com suporte de aço carbono (D e F) apresentaram menor taxa de desgaste quando comparadas às tratadas nas mesmas condições, porém utilizando-se o suporte refratário. Rutherford et. al. (1997) observaram comportamento semelhante ao realizarem uma pesquisa sobre revestimentos de NbN e TiN com camadas homogêneas e heterogêneas destes materiais. Os resultados mostraram um pior desempenho em desgaste do material com camadas heterogêneas, o que se deve parcialmente à influência das interfaces no mecanismo de falhas, promovendo a propagação das trincas nas interfaces ou mudanças no processo de remoção do material. Também foram identificados fatores contribuintes como a porosidade, inclusões e tensão residual [8].

Assim sendo, supõe-se que o material removido na superfície das amostras D, E, F e G seja apenas formado por óxidos ricos em Fe e que o substrato de aço não tenha

tido atingido, ficando assim protegido. Essa hipótese será confirmada ao se analisar qualitativamente as superfícies de desgaste ao microscópio eletrônico de varredura e ao se realizar análises químicas semiquantitativas por EDS no centro das calotas. Resultados que serão apresentados a seguir.

3.2 Análise Qualitativa – Mecanismos de Desgaste

Nos ensaios de desgaste microabrasivo podem ser observados dois tipos de mecanismos de desgastes: o riscamento que ocorre quando uma proporção significativa das partículas abrasivas incorpora à superfície da esfera e atua como entalhes fixos, produzindo uma série de ranhuras finas paralelas na superfície da amostra; e o rolamento, onde as partículas abrasivas não se encaixam, mas rolam entre as duas superfícies, produzindo uma superfície de desgaste fortemente deformada, com múltiplos recuos, sem direcionalidade de superfície evidente [8-12]. Um estudo desenvolvido por Cozza (2014) afirma que dependendo das condições dos ensaios é possível ocorrer os dois mecanismos simultaneamente com predominância, ou não de um deles. Quando ocorre a sobreposição destes dois mecanismos, caracteriza-se o microriscamento abrasivo [13].

As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, as superfícies de desgaste observadas por MEV, evidenciando os mecanismos de desgaste das amostras ensaiadas. Sendo possível compara apenas os efeitos microestruturais (A, B e C) na Figura 3 e os efeitos da oxidação (D, E, F e G) na Figura 4.

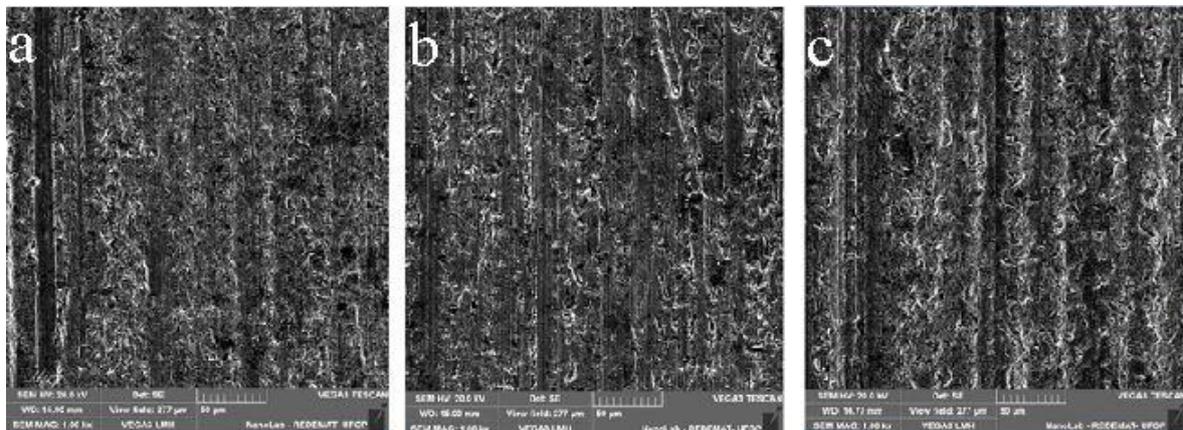


Figura 3. Imagens obtidas por MEV evidenciando os mecanismos de desgaste das amostras: a) Estado de Entrega (A) b) 900°C e 10 minutos (B) c) 1000°C e 10 minutos (C).

Um padrão de desgaste consistindo em linhas retas paralelas (ranhuras) é claramente visto nas amostras com o substrato não revestido pelo filme espesso de óxidos. O padrão de sulco também é observado, sugerindo que as partículas abrasivas de carboneto de silício provavelmente se aderiram à superfície da esfera, atuando como penetradores fixos e arranhando as superfícies das amostras.

Em testes realizados por Cozza (2011) com uma força normal constante, a área de desgaste aumentou com o tempo de teste, o que resultou em uma diminuição contínua da pressão. Em outras palavras, quando a área desgastada é grande, é possível supor que há uma quantidade maior de partículas abrasivas entre a esfera e a amostra e que a força normal atuando em cada partícula diminui, favorecendo a ocorrência de abrasão rolante [12].

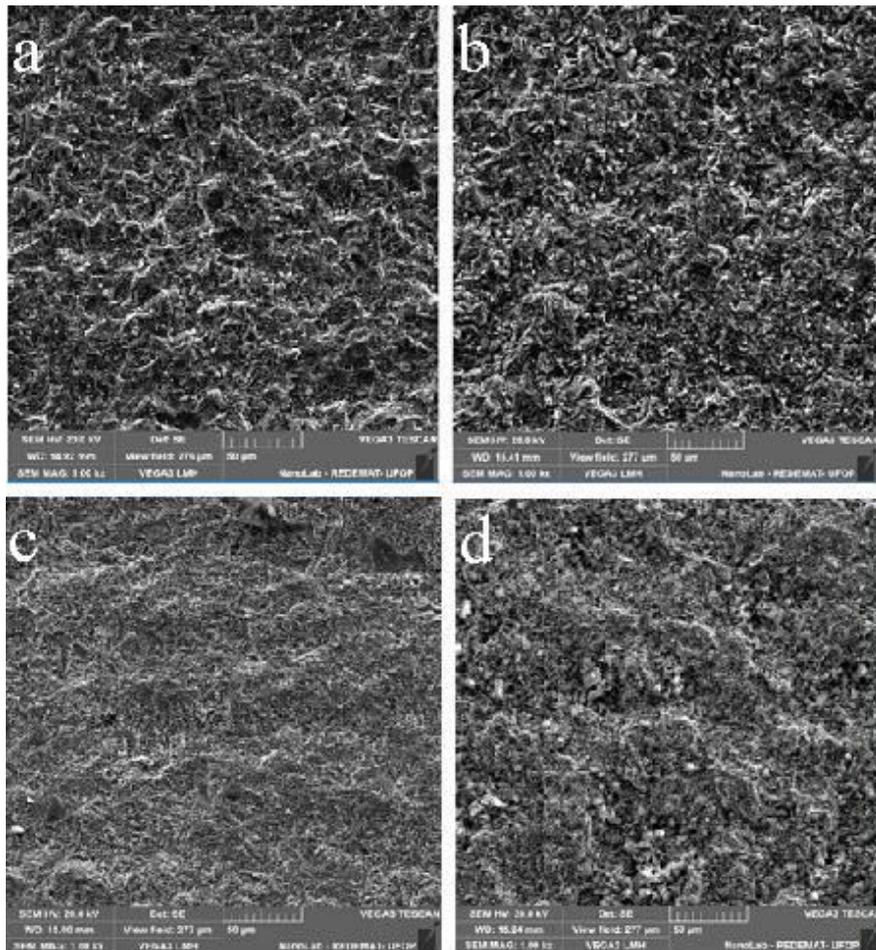


Figura 4. Imagens obtidas por MEV evidenciando os mecanismos de desgaste das amostras: a) 900°C e 72 horas – Com suporte (D) b) 900°C e 72 horas – Sem suporte (E) c) 1000°C e 72 horas – Com suporte (F) d) 1000°C e 72 horas – Sem suporte (G)

Nas amostras com presença da camada espessa de óxidos, ou seja, D, E, F e G, as calotas evidenciaram o mecanismo de desgaste por rolamento, que produziu uma superfície recortada e sem direção e, conseqüentemente, com a ausência de ranhuras direcionadas. O mecanismo de rolamento ocorre devido ao arrancamento de finas partículas de óxidos da amostra ensaiada. Logo, além do aumento da área de contato entre a esfera e a superfície da amostra durante o ensaio, tem-se também um aumento do volume de partículas de óxido juntamente às partículas de abrasivo, ambos diminuindo a tensão normal sobre cada partícula não permitindo que as mesmas se aderissem na esfera de aço. Estes resultados estão em concordância qualitativa com a literatura onde se afirma que para pequenos valores de forças normais e elevadas concentrações de material abrasivo em volume favorecem a abrasão rolante [8,12].

A análise feita por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura com a utilização do detector EDS permitiu obter o espectro de elementos no centro das calotas formadas nos ensaios de desgaste. A título de exemplificação, a Figura 5 apresenta o espectro medido no centro da calota da amostra do estado de entrega (sem oxidação) e a Figura 6 apresenta o espectro no centro da calota da amostra submetida ao tratamento isotérmico a 900°C por 72h com suporte refratário (oxidada). Pode-se perceber que na amostra oxidada, destaca-se elevada intensidade de um sinal com comprimento de onda associado ao oxigênio, o que

não aconteceu para a amostra do estado de entrega. Sendo assim, concluiu-se que na amostra oxidada, apesar dos indicadores quantitativos mostrarem maior remoção de material, o substrato não foi atingido e a camada de óxido formada no aço inoxidável 410D funcionou com uma proteção efetiva.

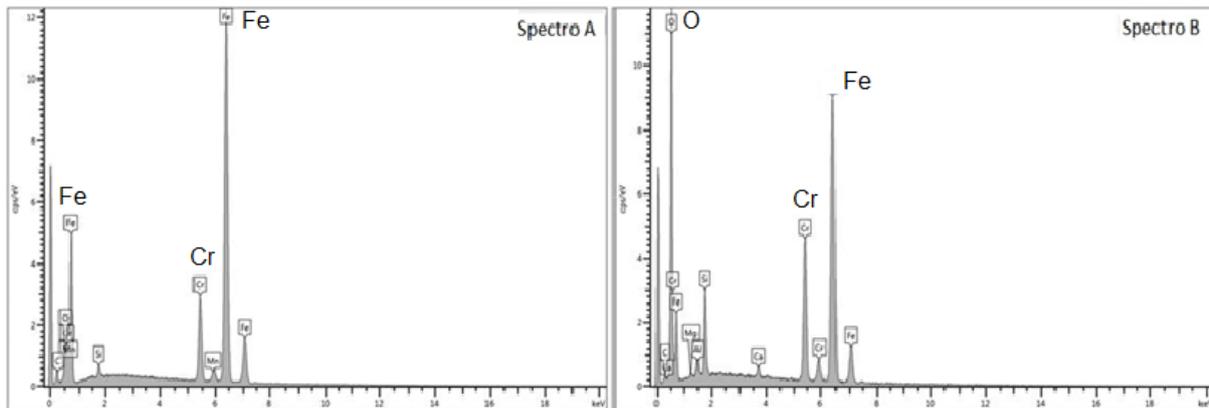


Figura 5. Espectro de elementos no centro da calota formada na amostra (a) Estado de Entrega; (b) Termicamente tratada a 900°C durante 72 horas

4 CONCLUSÃO

A microestrutura do material tem influência no desempenho em desgaste. A amostra com microestrutura martensítica apresentou um menor coeficiente de desgaste quando comparada com as estruturas ferrítica e bifásica. A estrutura bifásica apresentou o maior coeficiente de desgaste devido à recuperação da ferrita remanescente, que diminuiu a densidade de discordâncias e aliviou tensões, diminuindo a dureza do material.

As amostras com camadas espessa de óxidos apresentaram valores de coeficiente e taxa de desgaste maiores do que as amostras não oxidadas. Isso ocorreu devido ao crescimento do filme de óxido rico em Ferro, que é pouco aderente ao material sendo, portanto, removido durante o ensaio de desgaste. Entretanto o substrato não foi atingido durante o ensaio, como se verificou pela mudança de mecanismos de desgaste e por meio da análise química qualitativa obtida por EDS.

Sugere-se que uma condição mais favorável possa ser alcançada caso o crescimento apenas do filme de óxidos rico em cromo seja favorecido, pois esse é pouco poroso e muito aderente ao substrato. Essa condição poderia ser alcançada com menores temperaturas, ou menores tempos de tratamento térmico.

Os tratamentos térmicos foram realizados com dois suportes: aço carbono e material refratário. O suporte de aço carbono desfavoreceu a oxidação da amostra, pois atuou como um metal de sacrifício. O suporte refratário favoreceu a cinética de oxidação, favorecendo a formação de uma camada rica em óxido de ferro que possui pouca aderência. Apesar do substrato não ter sido alcançado durante os ensaios de desgaste, essa foi a condição menos favorável ao se avaliar os indicadores quantitativos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa APERAM por ceder gentilmente as amostras utilizadas neste trabalho, à CAPES e ao CNPq pelo financiamento de Bolsas de Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 VILELA, L.B.M. Efeito da Deformação a Frio e da Temperatura de Recozimento Final Sobre a Evolução Estrutural de um de um Aço Inoxidável Ferrítico ASTM 410. Dissertação de Mestrado. REDEMAT-UFOP. 2017.
- 2 ARRUDA, A.F.A.; CARVALHO, A.C.; MOREIRA, P.S.; QUEIROZ, R.R.U.; FARIA, G.L. Características da camada de óxidos formada no aço inoxidável 410D após tratamentos isotérmicos em atmosfera oxidante. 73º Congresso Anual ABM, 2018.
- 3 FARIA, G. L.; GODEFROID, L. F.; MENEZES, V. S. Development of a methodology for structural and mechanical characterization of extended sheets made from stainless steels. *Materials Research*, v. 18, p. 76-82, 2015.
- 4 FARIA, G. L.; GODEFROID, L. B.; FARIA, G. A.; DA CUNHA, E. C. Avaliação da Susceptibilidade à Corrosão Intergranular em Aços Inoxidáveis Aplicados em Chapas Expandidas. In: 22 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal –RN. 2016.
- 5 VILELA, L. B. M.; FARIA, G. L.; ALCANTARA, C. M.; OLIVEIRA, T. S.; COTA, A. B. Efeito da taxa de resfriamento sobre a formação de martensita em um aço inoxidável ferrítico com 11 %Cr e baixos teores de intersticiais. *Revista Matéria*. V.24. N.01. 2019.
- 6 WANG, J.; LUO, X.; SUN, Y. Torsional Fretting Wear Properties of Thermal Oxidation-Treated Ti₃SiC₂ Coatings. *Coatings*. V.8, 324. p.1-13. 2018.
- 7 ANTIPAS. G. S. E. Augmentation of Wear-protective Coatings for Non-ferrous Alloys by the Addition of Cr and Ni Elements. *Materials Research*. V. 17(6). P. 1485-1488. 2014.
- 8 RUTHEFORD, K.L.; Hutchings, IM. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test, *J.Test Eval. – JTEVA*. Vol.25(2), 1997, p.250–260.
- 9 COZZA, R.C. A study on friction coefficient and wear coefficient of coated systems submitted to micro-scale abrasion tests. *Surface and Coatings Technology*. Vol.215. 2013. p.224–233.
- 10 GANT, A.J.; GEE, M.G. A review of micro-scale abrasion testing, *Journal of Physics D: Applied Physics*. Vol.44, 2011.
- 11 TREZONA, R.I.; Allsopp, DN; Hutchings, IM. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear*. Vol.225–229, 1999, p.205–214.
- 12 COZZA, R.C.; Tanaka, DK; Souza, RM. Friction coefficient and wear mode transition in micro-scale abrasion tests. *Tribology International* Vol.44, Issue12, 2011, p.1878-1889..
- 13 COZZA, R.C. Third abrasive wear mode: is it possible? *Journal Materials Research and Technology*, Vol.3(2), 2014, p.191–193.